Entrada en Servicio de Botnia, como Autoproductor al Sistema Uruguayo

Fabio Añón, David Bonjour, Alvaro Musetti, Fredy Sánchez

***Abstract*—Botnia es el primer y más importante generador privado instalado en territorio uruguayo conectado directamente con la red de 150 kV. En este trabajo se analizó desde el punto de vista eléctrico, los efectos en la red y las condiciones de operación requeridas para la entrada en servicio de la planta.**

Se presentan en este trabajo los estudios eléctricos que incluyen análisis de flujo de carga, corrientes de cortocircuito y transitorios electromecánicos. Se controló el cumplimiento de los criterios de desempeño mínimo establecidos en los reglamentos de la red de trasmisión nacional.

De los estudios resultan recomendaciones en los ajustes de determinadas protecciones y reglas de operación para el sistema nacional y de la propia planta.

***Index Terms*— Power system planning, Power system simulation, Power system transient stability, Power system protection, Power generation dispatch, Stability criteria.**

I. NOMENCLATURA

SJA, FBE, MER, BOT: Estaciones de Transmisión 150kV San Javier, Fray Bentos, Mercedes y Botnia
RTU: Unidad Terminal Remota
CEPI: Condiciones eléctricas para pasaje a isla de Botnia

II. INTRODUCCION

LA planta industrial está ubicada en las proximidades de la ciudad de Fray Bentos sobre el Río Uruguay. Ésta mantiene un intercambio de energía con la red de Trasmisión de UTE mediante una conexión con la subestación de Fray Bentos (FBE) a través de una línea de 150kV, de 4.85km. La subestación de FBE se conecta a su vez con las estaciones de San Javier y Mercedes a través de 2 líneas de 81.9 y 31.5km respectivamente (Ver Fig. 1).
En la Fig. 2 se observan los tipos de conductores asociados a la alimentación de Botnia con sus límites térmicos correspondientes a la Trasmisión en régimen permanente sin contingencias (régimen N) y en contingencia simple (régimen N-1), así como los reenganches de líneas habilitados ya sea monofásico (R1F) cuando el circuito SJA- FBE- MER está anillado o reengancha trifásico (R3F) cuando es radial.

El proceso productivo hace que la empresa pueda auto satisfacer las necesidades que este implica en materia de energía eléctrica, generándose en ocasiones excedentes que pueden ser volcados al Sistema Interconectado Nacional.

En otras ocasiones, el proceso productivo resulta demandante de energía eléctrica del sistema, por ejemplo, en caso de una indisponibilidad forzada de sus propios generadores o por mantenimiento programado de los mismos.

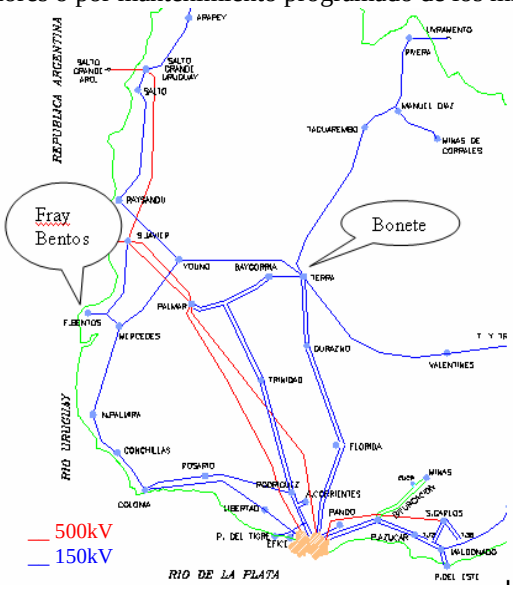

Fig. 1. Esquema geográfico uruguayo, donde se observa la estación de Fray Bentos, la red de trasmisión asociada y la central de generación más próxima a la estación (Central Bonete)

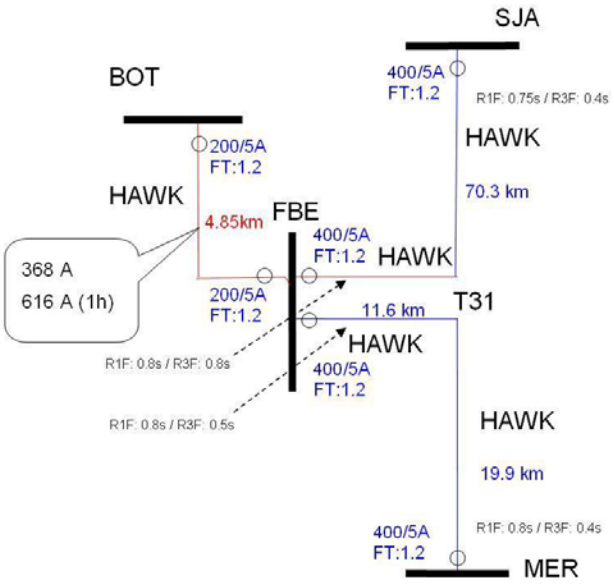

Fig. 2. Esquema unifilar asociado a la planta.

III. HIPÓTESIS

A. Escenarios

Para los estudios de flujos de carga se consideraron casos de mínima y máxima demanda en la red de UTE ocurridas en el invierno de 2007, de modo de obtener resultados en los casos más críticos. Por la misma razón se consideraron casos con mínimo control de tensión en la red de 150kV cercana a la subestación de Fray Bentos; por ejemplo, no se consideró generación en la central de Bonete.

B. Contingencias

Se estudió un único caso de contingencia en la red de UTE, siendo ésta considerada la situación más crítica en relación con el intercambio UTE-BOT y corresponde a la salida de la línea de 150kV: Fray Bentos- San Javier.
Los regímenes de operación de la planta Botnia, se corresponden con los flujos de carga presentados oportunamente por Botnia en régimen de operación normal y en contingencia. Las contingencias internas a la planta corresponden a la salida del generador 2, la salida de la planta química (Kemira) y a la desconexión en isla, en distintos niveles de producción.

C. Estabilidad

Modelos:
En simulaciones de estabilidad del sistema de potencia, para la red de UTE se representaron las cargas utilizando dos modelos: uno con características de potencia activa y reactiva constante, lo cual representa la situación más exigente con respecto al retorno a la estabilidad del sistema; y otro con 30% de la potencia activa constante (el resto de la potencia activa y reactiva con impedancia constante) representando un modelo más realista de la red de UTE en situaciones de máxima demanda. Con respecto a la carga de Botnia se modeló la carga activa y reactiva con un 95% de potencia constante y un 5% corriente constante.
La red Uruguaya incluida Botnia fue modelada completamente, mientras que la red Argentina ha sido tenida en cuenta solamente la red que vincula Salto Grande con Yacyretá, mientras que para el resto de la red ha sido utilizado un modelo equivalente.

Simulaciones:
Mediante simulaciones dinámicas, se estudiaron casos en dos situaciones de la red de UTE:

- Sin contingencias. Se observó la evolución transitoria del sistema eléctrico frente a contingencias internas en Botnia correspondiente a los siguientes casos:
  - Rechazo de generador STG 2 de BOT.
  - Rechazo de planta química de BOT.
  - Salida en isla de la planta de BOT.
- Con la contingencia: falta una fase-tierra en la línea de 150kV San Javier- Fray Bentos, próxima a la estación de Fray Bentos; y reenganche monofásico a los 800ms. Se observó la evolución transitoria del sistema eléctrico, y la posible apertura del interruptor principal que alimenta el transformador de carga de la planta, debido a la detección de CEPI a través de los relés de subtensión y sobrecorriente direccional allí instalados. Los casos analizados fueron:
  - Máxima demanda de UTE, con el proceso de producción mínima de BOT
  - Mínima demanda de UTE, con el proceso de producción máxima de BOT
  - Mínima demanda de UTE, con el proceso de producción mínima de BOT

D. Protecciones

Se tuvieron en cuenta las siguientes protecciones en la planta y en la red de UTE próximas a ella:

- Desconexión de la planta Botnia, implementada en UTE:
  Implementado en la RTU del puesto de conexión de dicha estación y que actúa provocando la apertura del interruptor de 150 kV línea a FBE. Si la tensión es inferior a 0.85 pu y Botnia esta consumiendo potencia activa (P < 0) se genera una alarma de subtensión a los 2 segundos y la señal de disparo a los 10 segundos.
- En las líneas de 150kV próximas a Botnia:
  La línea FBE-BOT no tiene recierre.
  Las líneas FBE-MER y FBE-SJA tienen recierre monofásico o trifásico dependiendo de la configuración de la red (cuando están anilladas es monofásico y cuando están radial es trifásico). Los tiempos son para recierre monofásico de 800ms y para trifásico de 500ms.
- Desconexión de carga activa en Botnia, frente a la salida de un generador.
  $P_t = G_b + \left(P_{mom} - P_{\max}\right)$; siendo:
  Pt: carga a desconectar.
  Gb: potencia generada por el generador más exigido.
  Pmom:Potencia inyectada a la planta antes del defecto.
  Pmax: máxima potencia que UTE puede inyectar a Botnia en régimen de operación normal de la red de UTE.
- Protecciones de detección de CEPI instalada en Botnia [2].
  Actúa la protección por subtensión junto con sobrecorriente direccional abriendo el interruptor de 150 kV de Botnia, así como el de 33 kV, de manera que los generadores no aporten a la falta.
  La protección de subtensión está ajustada en (0.8pu, 0.1s)
  La protección de sobrecorriente está ajustada en los valores: (1.2In, 0.1s). El interruptor abrirá cuando se detecta sobrecorriente inversa y subtensión.
- Protecciones de los generadores [2]:
  La protección de sobrecorriente está ajustada en los valores: (2.1In, 0.1s)
  La protección por subfrecuencia está ajustada en (48Hz, 20s); (47.5Hz, 2s)

IV. ANÁLISIS

A. Estudios de flujos de carga

Se calculó el límite máximo de potencia que Botnia puede absorber de la red de UTE, en condición de régimen normal de operación y en condición sin la línea de 150kV: SJA- FBE. El cálculo se realizó considerando como principales variables la demanda del sistema eléctrico y el nivel de tensión en barras de 150kV de la subestación FBE.

Con el fin de encontrar dicho límite, se calculó con flujos de carga la potencia reactiva que la planta debería entregar a la red, para cada nivel de potencia activa consumida desde la red de alta tensión. Este cálculo se realizó consignando la tensión en barras de 150kV para distintos niveles: 0.93, 1.0 y 1.07 pu.
En el cálculo del límite de potencia máxima se supone que la planta consumirá dicha potencia en un régimen de operación mayor a una hora, por lo cual se consideraron como limitantes térmicas en los equipos de Trasmisión de UTE:

1. Los correspondientes al régimen normal de operación cuando se considera la red de UTE sin contingencias.
2. Los correspondientes a la operación en contingencia (N-1) cuando se considera la línea San Javier- Fray Bentos fuera de servicio.

Los resultados se obtuvieron en las peores condiciones de configuración de la red y generación en el sistema de UTE, por lo que los límites de transferencia calculados podrán ampliarse en otras situaciones de la red.

B. Estudios de transitorios electromecánicos

El objetivo de los estudios realizados será analizar el impacto que tiene una contingencia dada, en el sistema eléctrico de UTE e interno a Botnia. Se verifica además, que ante posibles reenganches exitosos o no exitosos de la línea SJA-FBE, no se generen inestabilidades en el sistema eléctrico ya sea en caso de que la planta permanezca en servicio luego de la perturbación, como en el caso de desconectarse de la red debido a la actuación de las protecciones de detección de CEPI por subtensión y sobrecorriente.
Se presentarán además posibles soluciones cuando se observen inestabilidades en el sistema frente a una contingencia dada. En particular, se calculará la potencia máxima consumida por Botnia asegurándose la estabilidad del sistema frente a contingencias internas a la planta, y frente a contingencias en el sistema de Trasmisión de UTE próximas a la misma. Se estudió además la sensibilidad de la máxima potencia consumida, frente al modelo de la carga utilizado en las simulaciones dinámicas.
Por último se encontró el límite de actuación del sistema de detección de CEPI de la planta frente a una contingencia importante en la red de UTE, cercana a Botnia, buscándose de esta manera las peores perturbaciones que provocarán oscilaciones mayores en las variables eléctricas monitoreadas. En este caso se calcularon los principales modos de oscilación en determinadas variables del sistema.

TABLA I
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE CASOS

Dinámica de las variables electromecánicas		Régimen permanente		Transitorios electromecánicos
		N	N-1	
Tensión V/Vnom [pu]	EAT 500kV	0.95 a 1.05	0.93 a 1.07 <1.05 (en estaciones no reaisladas)	1.2≤V≤0.85, t≤60s ***Alerta:*** V>0.70 posterior a la falla; V<0.80 1s
	AT ≤150kV	0.93 a 1.07	0.90 a 1.10	Criterio Curva CBEMA: Vmín /t: V(0.7 0.8 0.9) /t(0.02s 0.5s 10s)
		Se realizará un análisis de las curvas PV y QV adoptándose márgenes adecuados entre la		
Corriente (Temperatura [°C])		Líneas: Ta=30, Tc=55 Cables: In calculada para Ta=20-25(inv-ver), Tc=75-80-90(según el tipo aislación: OIL-XLPE). Se adoptará I=0.8In Trafos: TR EAT/AT: I/Inom(tap)< 100% TR AT/BT: I/Inom< 100% TR I: I< Inom* FT (PEE)	Líneas: Ta=30, Tc=75 1h Cables: Idem rég. N, con Iini= 80%Inom Trafos: TR EAT/AT: I/Inom(tap)< 115%, (PEE) TR EAT/AT: I/Inom(tap)< 120%, (EYP, PLA)) TR AT/BT: I_cíclica<50%Inom TR I: I< Inom* FT (PEE)	Se tendrían iguales criterios que los adoptados para la condición N-1 (sobrecargas de corta duración). Se modelan las protecciones por sobrecorrinte en equipos de transmisión (PEE)
Angulo [°]		φ (ang. Interno entre tensión de campo y en bornes de la máquina) $\varphi 1$ (ang. Interno inicial en régimen) $\varphi 2 < 90$ (ang. Interno final en régimen) ***[ref 2]*** Diferencia angular entre puntos de sincronización de redes< 20		Desviación angular: No habrá pérdida de sincronismo de la unidad generadora en cuestión con el resto de máquinas sincronas conectadas a la red. $\Delta\varphi < 120$ ***Alerta:*** Angulo interno para el cual la velocidad de la máquina se anula: $\varphi 3 < 180 - \varphi 2$ Amortiguamiento: > 5%, Calculado a partir del análisis de Prony La relación de atenuación entre 2 picos sucesivos a partir de la 3a oscilación (entre el pico de la 3a y el pico de la 4a), A2/A1 <= 0.75) Luego de 20 s de simulación, la oscilación (correspondiente al ángulo interno del rotor de la máquina) debe estar completamente amortiguada
Frecuencia		50±0.2		50+3/-2.5, t<3s

V. RESUTADOS

A los efectos de la aceptación de las simulaciones ralizadas, se siguieron las pautas dadas en [1], que se resume en la TABLA I.

A. Estudio de flujos de carga

En todos los casos se obtuvo mediante estudios de flujo de carga, la máxima transferencia de potencia desde la red de UTE hacia BOT en la barra de 150kV.
El resultado se observa en las Fig. 3 y Fig. 4, representado por las curvas nombradas: Vmin, Vmed y Vmax; calculadas para el caso de la red de UTE en condición de régimen permanente (Fig. 3) y en condición de contingencia (Fig. 4) en situación de máxima demanda en el sistema. La zona delimitada por estas curvas, será a su vez reducida por:

- La capacidad máxima del transformador de Botnia 150/33kV, 63MVA
- La capacidad máxima de los transformadores de corriente allí instalados (240 A, en caso de conexión en 200/5)
- El factor de potencia de la carga inyectada a Botnia (fp> 0.95 de acuerdo con [1] cuando BOT consume potencia de la red de UTE)

- La capacidad máxima en líneas de Trasmisión en la red de UTE. En particular las líneas de 150kV: SJA-FBE-MER.

Se observa que la principal restricción al intercambio de potencia entre UTE y BOT está dada por el consumo de potencia de la planta (zona derecha) y no por la inyección de potencia hacia la red de UTE.

Del cálculo realizado, se deduce que la potencia máxima que la red de UTE puede inyectar a Botnia, para una demanda máxima igual a 1570MW y en condición de régimen permanente sin contingencia, es igual a 55MW; siendo éste el límite impuesto por la capacidad térmica máxima de la línea SJA-FBE. Sin embargo, la transferencia de potencia por esta línea estará limitada por la capacidad máxima del TI allí instalado, en caso de conextarse en el punto 200/5 A. Debido a esta restricción la potencia máxima inyectada a Botnia para máxima demanda debe reducirse a valores mínimos.

En condición de contingencia en la red de UTE, ante la salida de la línea SJA-FBE, la potencia máxima inyectada a Botnia se reduce a 0MW para valores de demanda máxima en el sistema, siendo el límite en este caso la tensión mínima en Botnia (o FBE) que alcanza los 0.9pu (ver Fig. 3). Concretamente, para niveles de demandas altas en la red de UTE, y en caso de contingencia de la línea SJA- FBE, no es posible mantener el consumo de Botnia con un factor de potencia superior a 0.95 (Fig. 4).

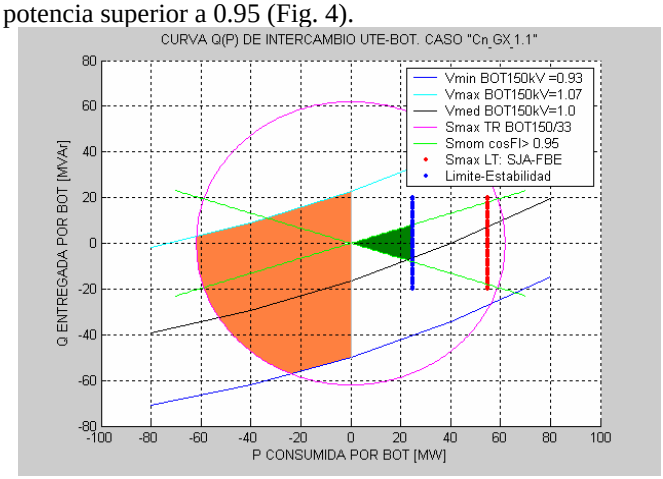

Fig. 3. Potencia máxima (red de UTE en condición de régimen permanente. Demanda máxima)

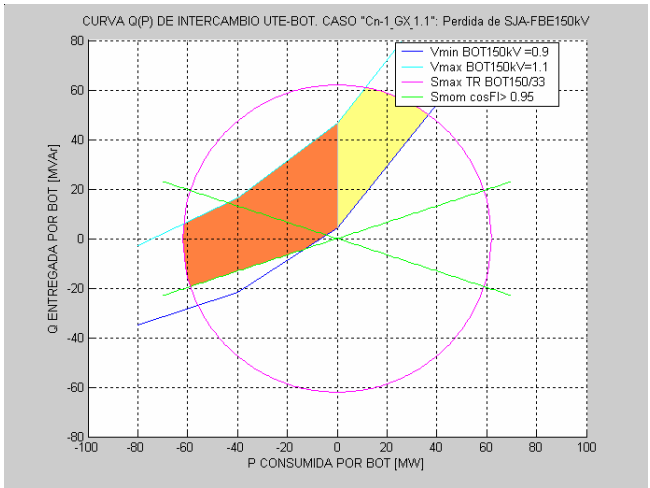
CURVA Q(P) DE INTERCAMBIO UTE-BOT. CASO "Cn-1_GX_1.1": Perdida de SJA-FBE150kV
Vmin BOT150kV =0.9
Vmax BOT150kV=1.1
Smax TR BOT150/33
Smom cosFI> 0.95
Q ENTREGADA POR BOT [MVAr]
P CONSUMIDA POR BOT [MW]

Fig. 4. Potencia máxima (red de UTE en condición de contingencia n-1.Demanda máxima)

La potencia máxima que UTE puede inyectar a Botnia depende fuertemente de la demanda y de la generación del sistema debido al flujo de potencia a través del vínculo SJA-FBE- MER y de la regulación de tensión del sistema próximo a la planta, en diferentes situaciones de operación.

En la Fig. 5, se muestra para casos sin generación en las centrales del Río Negro, la dependencia entre la demanda del sistema y la potencia máxima consumida por BOT en dos situaciones de carga de la línea SJA-FBE: una correspondiente al límite térmico impuesto por la línea, y otra correspondiente al límite impuesto por los transformadores de corriente (TI) allí instalados conectados en la relación 200/5.

En casos de máxima demanda, la corriente por la línea SJA-FBE es próxima a 240 A. Este punto se muestra en la Fig. 5 y se corresponde con el límite inferior de la recta que representa el límite impuesto por los transformadores de corriente conectados en la relación 200/5: “LT: SJA- FBE (limite TI)”.

Además, a modo de ejemplo, para una demanda del sistema igual a 1400MW, la potencia máxima inyectada a Botnia será igual a 14MW si se considera el TI como limitante, y 74MW en caso de considerar el límite térmico de la línea como limitante (suponiendo 400/5 los puntos de los TI) y sin considerar la limitante impuesta por el TR BOT 150/33kV.

Como observación importante se destaca que estos límites de consumo calculados, serán modificados como se verá en el capítulo correspondiente a estudios de estabilidad.

B. Estudios de estabilidad del sistema

En los gráficos, se detallan las curvas de respuesta transitoria correspondientes a las variables eléctricas principales que se observaron del problema. Estas variables deben verificar el cumplimiento de los criterios de estabilidad antes descriptos, así como también los límites térmicos de los equipos involucrados.

En cuanto a las condiciones previas a cada contingencia estudiada, se consideró como consigna de tensión en barras de 10.5kV, ajustada en 1.0pu.

A continuación se analizan algunos resultados obtenidos correspondientes a las diferentes simulaciones dinámicas realizadas.

1) Caso base (UTE con demanda mínima y generación semitérmica. Botnia con producción máxima)

Se simuló un reenganche monofásico no exitoso de la línea SJA-FBE, sin salida de Botnia. De los resultados obtenidos se verificó que las variables eléctricas del problema no excedan los rangos de operación admisibles, luego de despejada la falta: una fase tierra simulada durante 100ms. Asimismo, no se registraron actuaciones de protecciones en el sistema eléctrico, en particular no fue detectada las CEPI de la planta. Si bien el nivel de tensión durante la falta es inferior al ajuste de la protección por subtensión, la corriente máxima por la línea BOT- FBE fue del orden de 270 A; no superándose así el ajuste por sobrecorriente.

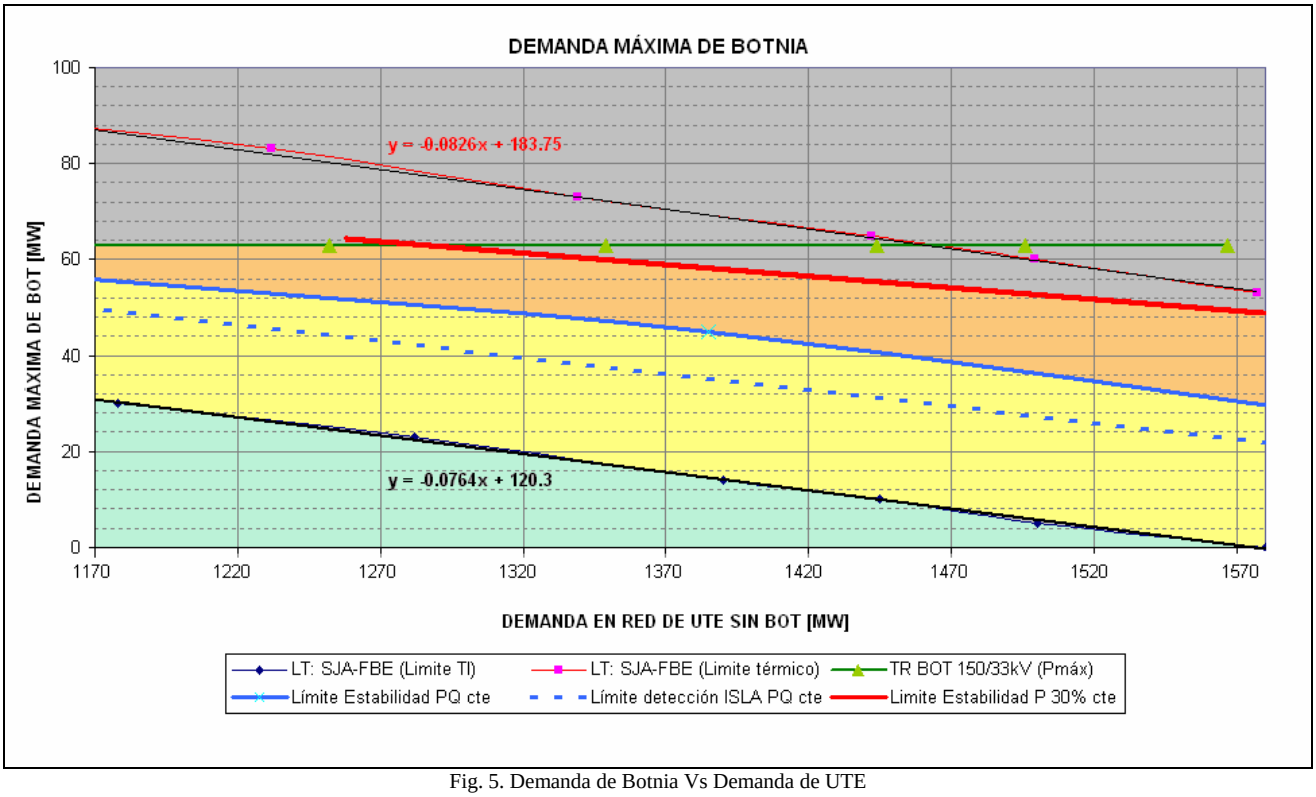

Fig. 5. Demanda de Botnia Vs Demanda de UTE

2) Caso base (UTE con demanda mínima y generación semitérmica. Botnia con producción mínima)

Se simuló un reenganche monofásico exitoso de la línea SJA-FBE, comparándose los resultados dados en dos casos distintos:

1) sin salida de Botnia, suponiendo que no se detectaron las CEPI
2) con salida de Botnia a los 200ms de ocurrida la falta monofásica, suponiendo que fue detectada la condición de CEPI.

Se muestran en estos casos, variables representativas de todo el sistema eléctrico.

En este caso fue detectada la condición de CEPI de la planta ya que el nivel de tensión durante la falta es inferior al ajuste de la protección por subtensión, y la corriente máxima por la línea BOT-FBE fue del orden de 325 A durante 100ms. La comparación entre los casos 1 y 2 se realiza suponiendo dos condiciones diferentes:

- Que los tiempos de actuación de las protecciones de UTE (despeje de la falta) son inferiores a 100ms, por lo que no se produciría la desconexión de Botnia del sistema interconectado.
- Que la duración de la falta es superior o igual a 100ms, produciéndose así la desconexión de la planta del sistema eléctrico, debido a la detección de CEPI de la misma.

Respecto del resto de las variables observadas en el sistema eléctrico, se verificó que no exceden los rangos de operación admisibles para tiempos posteriores al de despeje de la falta. Tampoco se registraron otras actuaciones de protecciones en el sistema eléctrico, en particular se produjo un reenganche exitoso de la línea SJA-FBE.

3) Caso base "Cn_GX_3.1" (UTE con demanda máxima y generación semitérmica. Botnia con producción mínima)

A partir de la condición inicial fijada por este caso base, se simuló el recierre no exitoso de la línea SJA-FBE. En este caso, luego de la apertura de la línea SJA-FBE, queda la carga de Botnia alimentada desde Mercedes a través del circuito de alta tensión: MER-FBE-BOT. Dependiendo del nivel de demanda de la planta, se podrán producir subtensiones importantes en el sistema que conducirán a un colapso total del sistema eléctrico. Las variables relevantes en este estudio fueron la tensión en Botnia y la corriente por BOT-FBE.

Se analizaron dos casos:

- Ajustándose el nivel máximo de consumo de la planta con el fin de lograr la desconexión en isla antes de producirse el colapso de tensión (en particular se adoptó como límite es estabilidad el valor 0.7pu). En este caso se analizó con diferentes modelos de carga en la red de UTE.
- Ajustándose el nivel máximo de consumo de la planta con el fin de lograr que la tensión no alcance el nivel de detección de CEPI luego de producirse la apertura de la línea SJA-FBE.

a) Caso: Reenganche monofásico no exitoso de la línea SJA- FBE, con salida de Botnia (límite de estabilidad del sistema).

El cálculo de la demanda máxima consumida por la planta fue realizado de modo de evitar que el nivel mínimo de tensión en Botnia alcance los 0.7pu, luego de transcurridos 200ms a partir del cual se detecte una subtensión inferior a 0.8pu (200ms= 100ms con subtensión inferior a 0.8pu, más 100ms de demora en la apertura del interruptor principal). El fin es asegurar que la planta se desconecte de la red de UTE antes de alcanzarse el valor de 0.7pu en cualquier punto de la red.

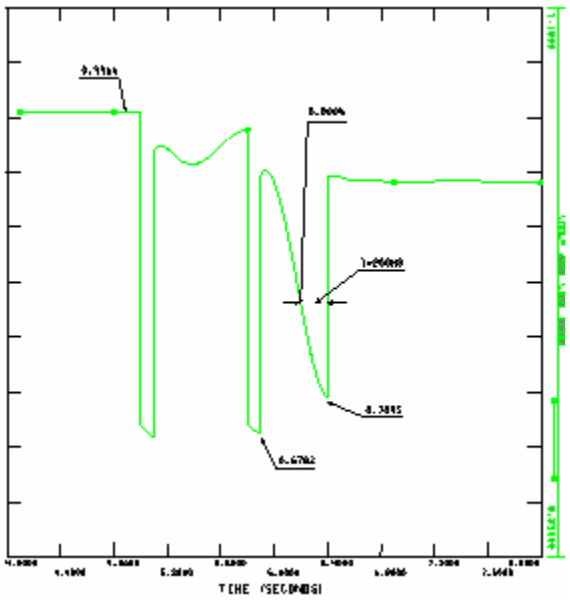

Fig. 6. Tension en Botnia (modelo de carga P 30% cte, resto imp cte). Dem BOT 46MW. Dem UTE 1570MW

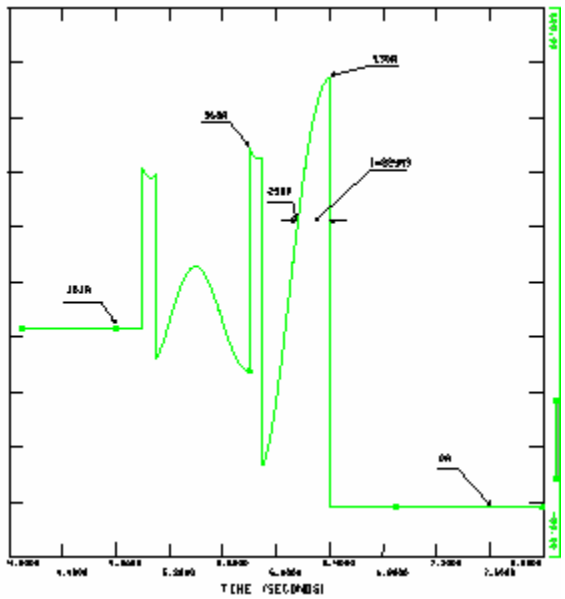

Fig. 7. Corriente en Botnia (modelo de carga P 30% cte, resto imp cte). Dem BOT 46MW. Dem UTE 1570MW

La carga máxima consumida por la planta resultó ser igual a 25MW para una demanda máxima de UTE igual a 1570MW, y considerando un modelo de carga con potencia activa y reactiva constantes. Este valor es mayor en caso de utilizar un modelo de carga más realista para la red de UTE (suponiéndose 30% P cte y resto impedancia constante), alcanzándose un valor de 48MW, como se observa en las Fig. 6 y Fig. 7 de este mismo anexo.

Respecto del resto de las variables observadas en el sistema eléctrico, se verificó que no exceden los rangos de operación admisibles para tiempos posteriores al de despeje de la falta y apertura definitiva de la línea SJA-FBE.

Observación: El mismo cálculo de la potencia máxima consumida por Botnia se realizó para diferentes niveles de demanda en UTE. Se pueden observar los resultados representados por la recta denominada: 'Límite de estabilidad P 30% cte'. De la misma forma se resolvió el problema considerando un modelo de carga diferente (en este caso la representación gráfica es la denominada: "Límite estabilidad PQ cte")

b) Caso: Reenganche monofásico no exitoso de la línea SJA- FBE, sin salida de Botnia (límite de estabilidad del sistema).

En este caso se buscó el límite máximo de consumo de Botnia que permite mantener conectada la planta luego de la perturbación mencionada (no superándose ni el límite de sub-tensión ni el de sobrecorriente correspondientes a la detección de CEPI), manteniéndose la estabilidad del sistema.

El cálculo de la demanda máxima consumida por la planta fue realizado de modo de evitar que el nivel mínimo de tensión en Botnia alcance los 0.8pu, luego de la apertura definitiva de la línea SJA-FBE. El fin es asegurar que la planta no se desconecte de la red de UTE (la protección de detección de CEPI requiere que se verifique un nivel de tensión inferior a 0.8pu y de corriente superior a 1.2pu durante 100ms).

La carga máxima consumida por la planta en este caso resultó ser igual a aprox. 20MW para una demanda máxima de UTE igual a 1570MW, y considerando un modelo de carga con potencia activa y reactiva constantes.

En este caso se observan desviaciones mayores en las variables, respecto de los demás casos analizados, por lo que se realizó la descomposición en armónicos de las desviaciones de ángulo en la máquina STG1 de Botnia, así como de la frecuencia del sistema (medida en Bonete).

En la desviación angular de STG1 de BOT, se observa una componente subarmónica de la señal con un modo de oscilación de aproximadamente 1.0Hz y un amortiguamiento del 3%. También se observa un modo de oscilación de aprox. 2Hz con el mismo coeficiente de amortiguamiento. El resto de las componentes tienen una amplitud inferior al 5% de la componente 1 o amortiguamientos mayores al 5%, como se observa en la TABLA II y Fig. 8 para la señal completa y su descomposición en la componente 1 y en resto de las componentes).

En la desviación de la frecuencia del sistema, se observa una componente subarmónica de la señal con un modo de oscilación de 1.008Hz y un amortiguamiento del 3%, al igual que la desviación angular de la máquina STG 1 en Botnia; aunque las magnitudes de esta componente para las distintas señales son diferentes. El resto de las componentes tienen una amplitud inferior al 5% de la componente 1 o amortiguamientos mayores al 5%.

Los modos de oscilación de 1 y 2Hz encontrados corresponden a modos locales en sistema eléctrico. Si bien el coeficiente de amortiguamiento de dichos modos de oscilación resulta ser inferior al 5%, el caso simulado se consideró aceptable ya que las variables registradas durante la simulación se amortiguan hasta valores mínimos luego de los 20s.

Respecto del resto de las variables observadas en el sistema eléctrico, se verificó que no exceden los rangos de operación admisibles para tiempos posteriores al de despeje de la falta y apertura definitiva de la línea SJA-FBE.

TABLA II
ANÁLISIS DE PRONY PARA LA DESVIACIÓN ANGULAR DEL STG1 DE BOTNIA

ANÁLISIS DE PRONY					MODAL	COMPONENTS				
Variable: Desviación angular STG 1 BOT										
			COMP.	EIGENVALUE		EIGENVECTOR				
			NO	REAL	IMAGINARY	MAGNITUDE	ANGLE	REMARKS		
Coeficiente de amortiguamiento	**Módulo (%), comp_i/ comp_1**	**Frecuencia [Hz]**								
	100%		1	-0.0014617	--	-4.32E+01	--	TCNST:	684.13	SC.
-3%	**-42%**	**1.008**	2	-2.01E-01	6.33596	1.82E+01	25.31	FREQ.:	1.008	HZ.
	8%		3	-0.729102	--	-3.65E+00	--	TCNST:	1.372	SC.
-23%	**-4%**	**1.085**	4	-1.60187	6.81951	1.64E+00	118.6	FREQ.:	1.085	HZ.
-45%	**-2%**	**0.336**	5	-1.06201	2.11045	7.11E-01	-80.52	FREQ.:	0.336	HZ.
-3%	**-1%**	**2.017**	6	-0.401199	12.6727	5.24E-01	52.45	FREQ.:	2.017	HZ.
-10%	**-1%**	**0.723**	7	-0.476527	4.54311	3.54E-01	-67.66	FREQ.:	0.723	HZ.
-10%	**0%**	**2.209**	8	-1.35528	13.8776	1.09E-01	-17.24	FREQ.:	2.209	HZ.
-9%	**0%**	**1.649**	9	-9.52E-01	10.3615	8.58E-02	-172.98	FREQ.:	1.649	HZ.
-6%	**0%**	**1.723**	10	-0.677625	10.8265	5.62E-02	-62.35	FREQ.:	1.723	HZ.
-3%	**0%**	**2.473**	11	-0.534397	15.5363	9.06E-04	97.1	FREQ.:	2.473	HZ.
15%	**0%**	**1.02**	12	0.943682	6.40802	2.24E-05	139.02	FREQ.:	1.02	HZ.

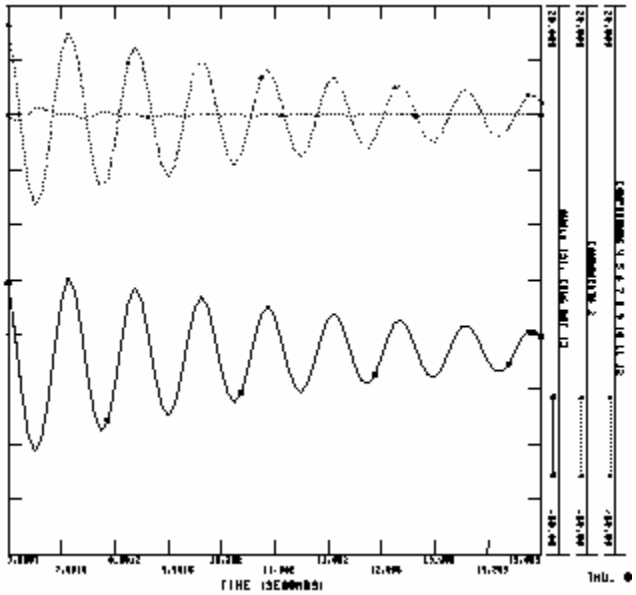

Fig. 8. Descomposición de armónicos de la desviación angular en STG 1 de Botnia

4) Límites de Trasmisión de energía eléctrica

Los límites de Trasmisión de energía eléctrica entre UTE y BOT en condiciones de régimen permanente, están limitados principalmente por la capacidad del TR 150/33kV de BOT y por la capacidad térmica de la línea SJA-FBE. Además, puede verse que la capacidad de los TI de la línea SJA-FBE (conectado en el punto de 200A) disminuye en aproximadamente 60MW la potencia máxima que BOT podría consumir, respecto a lo que permitiría la capacidad de la propia línea. Para demandas de UTE mayores a 1470MW aproximadamente, la limitante que impone el TI hace que el máximo consumo de BOT no pueda superar los 10MW (incluso para demandas de UTE del orden de los 1580MW este consumo se reduce a cero), mientras que si la limitante fuera la capacidad de la línea SJA-FBE este consumo máximo de BOT podría llegar aproximadamente a los 60MW. Para demandas de UTE menores, la limitante corresponde a los 63MVA impuestos por la capacidad del TR de BOT 150/33kV.

Adicionalmente a los límites de transferencia en régimen permanente antes mencionados, se destaca el límite impuesto por la estabilidad del sistema frente a una apertura definitiva de la línea de 150kV: SJA-FBE, el cual es inferior al definido por la capacidad térmica de los equipos de Trasmisión.
Se puede resumir el límite de consumo de Botnia, mediante las zonas marcadas en la representación gráfica definida en función de la demanda de UTE y de los límites de transferencia antes mencionados. Las zonas válidas también se ven en la TABLA III, destacándose que si se considera la conexión de los TIs instalados en las líneas SJA-FBE-MER, en 400/4A, se amplía la zona de validez de la verde a la amarilla, donde la condición limitante es la estabilidad del sistema. Considerándose además, un modelo de carga menos exigente, se podrá ampliar la zona válida de consumo de Botnia a la zona naranja, siendo en este caso limitante la condición dada por la estabilidad para demandas mayores a 1270MW y por la capacidad del TR BOT 150/33kV para demandas menores.

TABLA III ZONAS VÁLIDAS PARA EL CONSUMO DE BOTNIA

		Limitante			
ZONA	Demanda UTE	TI SJA- FBE	Estabilidad PQ cte	Estabilidad P 30% cte	TR BOT 150kV
Verde	Sin restricciones	X			
Amarillo	Sin restricciones		X		
Naranja	< 1270				X
	> 1270			X	

C. Conclusiones y recomendaciones

De los estudios realizados se concluye lo siguiente:

1. La capacidad de los TI instalados en las líneas de 150kV: SJA-FBE-MER, conectados en 200 A, limitan considerablemente el consumo máximo de la planta reduciéndose a 0MW para una demanda de UTE de 1570MW. Eliminando esta restricción, podrá aumentarse el consumo máximo de BOT hasta un máximo de 48MW para el mismo nivel de demanda en UTE.
   (Se recomienda entonces, mantener el punto de conexión primaria a 400 A).
2. Para niveles de demandas altas en la red de UTE, y en caso de contingencia de la línea SJA-FBE, no es posible mantener el consumo de Botnia con un factor de potencia superior a 0.95.
3. Los resultados encontrados derivan de haber configurado la red de UTE con el circuito oeste sur abierto (situación de operación de la red actual), lo que implica tener un control de tensión y una distribución de flujos por las líneas del circuito en estudio, lejos del óptimo. Esto limita el nivel de consumo de potencia máxima posible de la planta.
   Se recomienda estudiar la posibilidad de cerrar el circuito oeste sur.
4. Los límites de estabilidad en tensión encontrados, se basaron en los ajustes de las protecciones de detección de CEPI ya mencionados:
   - La protección de subtensión ajustada en (0.8pu, 0.1s)
   - La protección de sobrecorriente ajustada en los valores: 3Idir>>(1.2In, 0.1s) siendo In=242 A

   Se destaca que cualquier cambio en el ajuste de estas protecciones motivará un nuevo estudio y recálculo de los límites máximos de consumo.
5. Se observa en el gráfico la sensibilidad del límite de consumo máximo de la planta frente al cambio en el modelo de carga utilizado en la red de UTE, variando desde la zona amarilla hasta la naranja. Dado que para niveles de demandas altas, el comportamiento de la carga en UTE es más resistivo, se recomienda adoptar como zonas válidas de operación, las coloreadas con verde, amarillo y naranja (siempre que los TI en las líneas SJA-FBE- MER, estén conectados en 400 A).

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo desean agradecer a todos aquellos funcionarios pertenecientes a diversas unidades de UTE y al personal de Botnia que con su aporte de información permitió la realización de estos estudios.

VII. REFERENCES

Periodicals:

[1] Criterios de desempeño mínimo del sistema eléctrico establecidos en el artículo 6, del anexo II del reglamento de trasmisión (RT) de UTE

Technical Reports:

[2] Poyry Forest Industry Oy (October 17, 2006). Ref. No 16A2093-E0062. Fault current calculations and protection relay settings. E-mail jouko.kolsi@poyry.com

VIII. BIOGRAFÍAS

Fabio Añon Boedo nació en la ciudad de Montevideo en la República Oriental del Uruguay el 4 de mayo de 1968. Fue graduado como Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Su experiencia laboral, ha sido obtenida en U.T.E. (Usinas y transmisiones eléctricas). Trabajó entre los años 1997 y 2004 en el Sector Telecomunicaciones. Desde el año 2005 a la actualidad trabaja en estudios eléctricos en redes de transmisión, desempañándose actualmente en el departamento de Estudios Dinámicos de la Red de Trasmisión de UTE, Uruguay.

David Bonjour Condon nació en la ciudad de Trinidad en la República Oriental del Uruguay el 17 de junio de 1964. Fue graduado como Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.
Su especial área de interés de trabajo incluye estudios de transitorios electromagnéticos (TEMG) y electromecánicos (TEMC), incluyendo el desarrollo y modelado de los equipos de trasmisión y generación asociados, desempañándose desde el año 1994 en el departamento de Estudios Dinámicos de la Red de Trasmisión de UTE, Uruguay.

Alvaro Musetti Perna, nació en Montevideo, Uruguay, el 3 de abril de 1965. Se graduó de Ingeniero Electricista en la facultad Ingeniería de Montevideo. Su experiencia laboral, a sido obtenida en U.T.E. Trabajó entre los años 1990 y 1997 en distribución. A partir de 1998 comenzó a trabajar como ingeniero especialista en estudios dinámicos de la red, orientado a la planificación de la explotación del sistema eléctrico nacional, cargo que actualmente desempeña. Las áreas temáticas en que desarrolló su experiencia abarcan los estudios de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, sistemas de control de unidades de generación, y planificación de la operación de la red.

Fredy Sánchez Dapiaggi nació en la ciudad de Montevideo en la República Oriental del Uruguay el 13 de diciembre de 1966. Fue graduado como Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.
Su especial área de interés de trabajo incluye estudios de transitorios electromagnéticos (TEMG) y electromecánicos (TEMC), incluyendo el desarrollo y modelado de los equipos de trasmisión y generación asociados, desempañándose desde el año 2006 en el departamento de Estudios Dinámicos de la Red de Trasmisión de UTE, Uruguay.